



УДК 621.313.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

## RESEARCH OF HEATING PROCESESS OF LINEAR INDUCTION MOTOR

**Смолянов Иван Александрович**, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru, Тел.: +7(950)555-34-50

**Сарапулов Федор Никитич**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: sarapulovfn@yandex.ru

**Ivan. A. Smolyanov**, Master student, Department «Elektromechanika», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru +7(950)555-34-50

**Fedor. N. Sarapulov**, Doctor Sc., Prof., Department «Elektromechanika», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-

**Аннотация:** В данной работе предлагается упрощенная математическая модель линейной индукционной машины для анализа тепловых режимов. Модель учитывает вынос тепла из активной зоны во время движения вторичного элемента. Оценивается влияние скорости ВЭ на нагрев движущихся частей при проектировании.

**Abstract:** The report presents a simplified mathematical model of linear induction motor to study its thermal regimes. The model takes into account the heat removal from the active zone due to the movement of the secondary element. The estimation of influence of motor speed on the temperature of the elements of its design.

**Ключевые слова:** электропривод; моделирование; переходные процессы.

**Key words:** LINEAR INDUCTION MOTOR, MODEL, HEATING, DESIGN ELEMENTS, THE SPEED OF MOVEMENT.

### ОБЩИЕ ПРАВИЛА

Сотрудниками Донецкого национального технического университета (Украина), Уральского государственного технического университета (ныне Уральского федерального университета), а также Первомайским электромеханическим заводом (г. Первомайск, Луганской области, Украина) был разработан тяговый электропривод транспортной системы для Междуреченского ГОК «Кемеровоуголь». Многодвигательный электропривод конвейерного поезда (КП) представляет собой совокупность трехдвигательных модулей, рассредоточенных по всей трассе движения КП в зависимости от ее профиля (угла подъема). Каждый модуль состоит из трех двигателей, устанавливаемых в междурельсовом пространстве путевой структуры, трех передвижных устройств управления и компенсации и одной комплектной трансформаторной подстанции. На рис. 1 приведен общий вид линейного асинхронного двигателя (ЛАД) типа ДАЛ-О-13-11(Ж) УХЛ1 [1,2,3]. Индукторы расположены на полотне дороги, а вторичные элементы – под днищами движущихся

вагонов. Номинальные данные двигателя: напряжение 660 В, ток 780 А, частота сети 50 Гц, активная мощность 150 кВт, скорость 11 м/с. Пусковой ток двигателя 1070 А, максимальное тяговое усилие 18.5 кН.

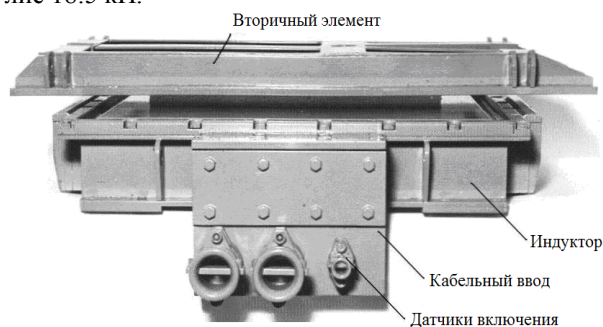


Рис. 1. Общий вид тягового ЛАД  
II. Результаты

### ЭЛЕКТРОМАГНИННЫЙ РАСЧЕТ

Электромагнитный расчет производится с использованием многослойной детализированной схемы замещения [4]. При этом полная магнитная схема замещения формируется путем каскадного

включения многополюсников, каждый из которых соответствует магнитной цепи отдельного зубцового деления, как показано на рис. 2. В рассматриваемом случае модель имеет 36 участков (зубцовых делений) по длине индуктора, по 30 участков в левой и правой от индуктора краевых зонах и 14 слоев по высоте зоны моделирования, т.е. девятнадцать 14-слойных многополюсников.

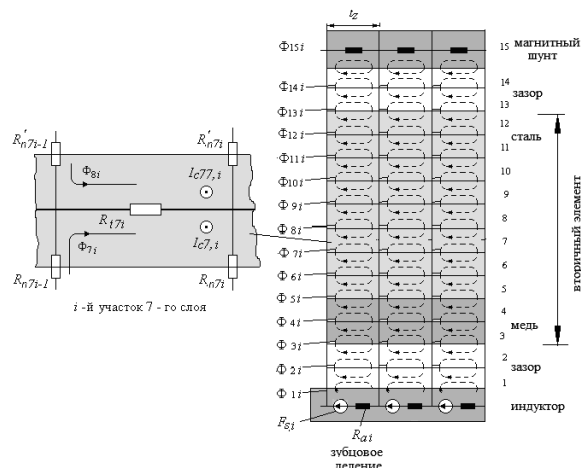


Рис. 2. Фрагмент ДМСЗ трех зубцовых делений двигателя

На схеме замещения обозначены: контурный поток  $\Phi_{n,i}$  n-го слоя i-го участка, его нормальное  $R_n$  и тангенциальное  $R_t$  магнитные сопротивления, пазовая МДС индуктора  $F_{s,i}$ , индуцированные токи в i-м участке верхнего  $I_{cni}$  и нижнего  $I_{cni}$  полуслоев, магнитное сопротивление i-го участка яра индуктора. Значения толщины, относительных нормальной и тангенциальной составляющих магнитной проницаемости, а также электропроводности каждого слоя задаются массивом соответствующих величин (рис. 3). Они могут быть уточнены в процессе расчета путем итерационных процедур ( $\gamma_b = 57 \cdot 10^6$  1/Ом/м.  $\mu_b = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м).

Система матричных уравнений магнитного состояния всей цепи записывается в виде:

$$\begin{cases} (Z_{01})(\Phi_1) - (\Phi_2) = (R_1^{-1})(F_{0s}), \\ \dots \\ -(r_3)(\Phi_2) + (Z_{03})(\Phi_3) - (\Phi_4) = 0, \\ \dots \\ (R_{14})(\Phi_{14}) + (Z_{15})(\Phi_{15}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $(r_n) = (R_n^{-1})(R_{n-1})$  и  $(Z_{0n}) = (R_n^{-1})(Z_n)$  для  $n=1 \dots 14$ ,  $(R_n)$  и  $(Z_n)$  - матрицы магнитных сопротивлений слоев,  $(\Phi_n)$  - векторы потоков,  $(F_{0s})$  - вектор МДС пазов индуктора. Из решения (1) находятся распределения по участкам и слоям магнитных потоков, нормальных и тангенциальных индукций, индуцированных токов, нормальных и тяговых усилий. В таблице 1 приведены основные характеристики двигателя

при неподвижном ВЭ с различной толщиной его стального слоя. Плотность тока в обмотке индуктора равна 17 А/мм<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned} h &:= (6 \ 6 \ 2 \ 1 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5)^T \cdot 10^{-3} \\ &\text{зазор медь массивная сталь} \\ \gamma_{\text{mat}} &:= (0.0001 \ 0.0001 \ 1 \ 1 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \dots \\ &\dots 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.0001 \ 0.0001)^T \\ \mu_t &:= (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 50 \ 60 \ 75 \ 90 \ 115 \ 350 \ 550 \ 500 \ 1 \ 1)^T \\ \mu_n &:= \mu_t \end{aligned}$$

Рис. 3. Массивы толщин, удельных электропроводностей и магнитных проницаемостей слоев расчетной области

Таблица 1

Толщина стали ВЭ, мм	$F_{\text{тяг}}$ , кН	$P_1$ , кВт	$F_{\text{нор}}$ , кН
6	4.61	100	13.6
8	4.62	101	13.3
15	4.59	101	12.4

Вместе с тем выбор толщины стального слоя ВЭ существенно влияет на параметры двигателя при больших скоростях движения поезда, что видно из Таблицы 2.

Таблица 2

Скорость, м/с	$F_{\text{тяг}}$ , кН	$P_1$ , кВт	$F_{\text{нор}}$ , кН	Толщина стали ВЭ, мм
0	4.61	101	13.6	6
6.6	7.58	141	13.3	6
10.6	7.56	145	12.4	6
10.6	10.02	178	8.4	8

Это можно объяснить насыщением тонкого ферромагнитного слоя ВЭ при его малой толщине. На Рис. 4 показаны распределения относительной магнитной проницаемости слоев стальной полосы по толщине ВЭ.

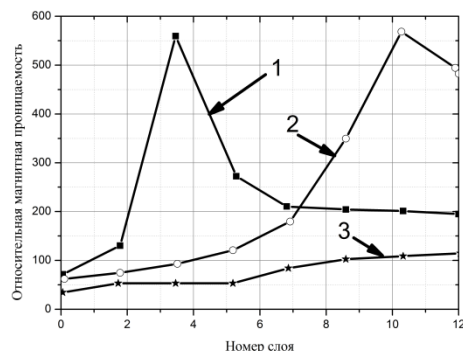


Рис. 4. Распределения относительной магнитной проницаемости слоев стальной полосы по толщине ВЭ. 1- толщина стальной полосы ВЭ 15 мм, 2 – 8 мм, 3 – 6 мм

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Эквивалентная тепловая схема (ЭТС) ЛАД с неподвижным вторичным элементом (модель 1) подобна известным ЭТС обычных вращающихся электрических машин [5,6] и приведена на рис. 5 (ключи  $K$  разомкнуты, т.е. ВЭ не выступает за пределы активной зоны индуктора и представлен

одной тепловой массой  $M2$  в этой зоне). Следует отметить, что в рассматриваемой схеме индуктор изображен сверху и соответствует варианту расположения двигателя на движущемся поезде. Указанная особенность не принципиальна с точки зрения рассмотрения процессов в электроприводе.

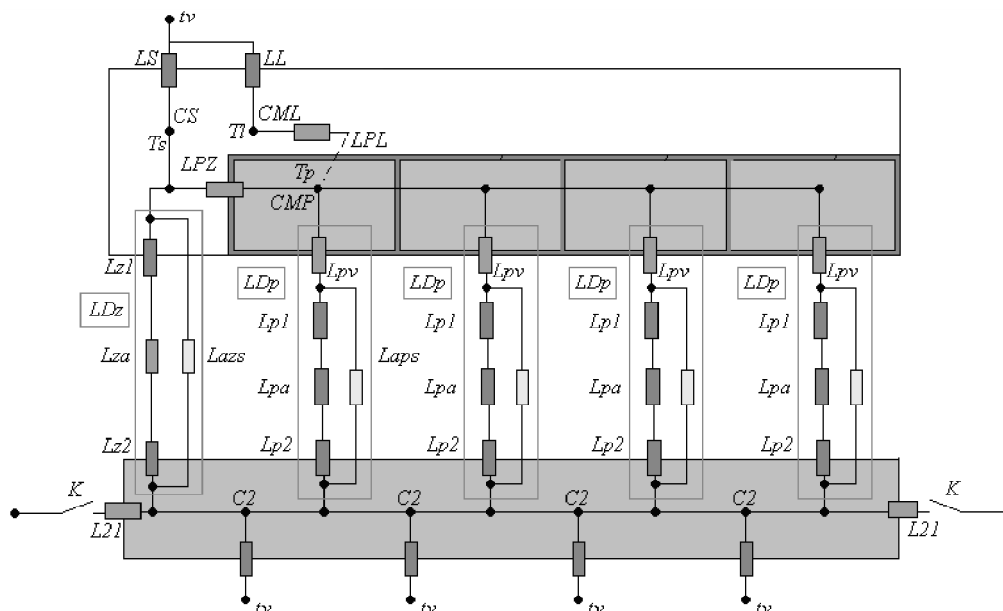


Рис. 5. Детализированная тепловая схема замещения ЛАД

Тепловые массы меди пазовых частей обмотки, ее лобовых частей и сердечника индуктора связаны между собой тепловыми проводимостями теплоотдачи:  $LS$  – сердечник – воздух;  $LL$  – лобовые части – воздух;  $Lz1$  – поверхность зубцов – воздух;  $Lz2$  – поверхность ВЭ, перекрытая зубцами, – воздух;  $Lp2$  – поверхность ВЭ, перекрытая пазами, – воздух с учетом теплового сопротивления электроизоляции катушек;  $LK2$  – ВЭ – воздух; теплопроводности:  $LPZ$  – медь пазов – электроизоляция – сердечник (зубцы);  $LPL$  – медь пазов – медь лобовых частей;  $Lza$  – воздушный зазор под зубцами;  $Lpa$  – воздушный зазор под пазами;  $L2l$ ,  $L2r$  – активная часть ВЭ – выступающие пассивные левая и правая части ВЭ; излучения:  $Lazs$  – внешние поверхности зубцов – ВЭ;  $Laps$  – внешние поверхности катушек в пазах – ВЭ. Если учесть теплоотдачу активной части ВЭ к его выступающим слева и справа пассивным частям (модель 2), получаем такую же ЭТС (рис. 4), но при замкнутых ключах.

Тепловая математическая модель двигателя представляет собой систему дифференциальных уравнений (2), записанных для температур выделенных тепловых масс (узлов) в соответствии с методом узловых потенциалов [7-9].

$$\frac{dT_i}{dt} = A \cdot T_{i-1} - B \cdot T_i + C \cdot T_{i+1} + D + q'_w \quad (2)$$

Коэффициенты системы уравнений

$$A = \frac{a}{t_z^2} + \frac{v}{t_z}; \quad B = \frac{2a}{t_z^2} + \frac{a}{c_p \cdot d \cdot \Delta} + \frac{v}{t_z}; \quad C = \frac{a}{t_z^2};$$

$$D = \frac{\alpha}{c_p \cdot d \cdot \Delta} T_c;$$

На рис. 6 показано распределение температур элементов индуктора по его длине в начале, середине и конце интервала времени нагрева  $t_k = 500$  с при движущемся с номинальной скоростью поезде и детализации активной части двигателя на 4 участка. Видно, что температуры различных участков (с 1-го по 4-й) каждого выделенного элемента конструкции изменяются во времени одинаково.

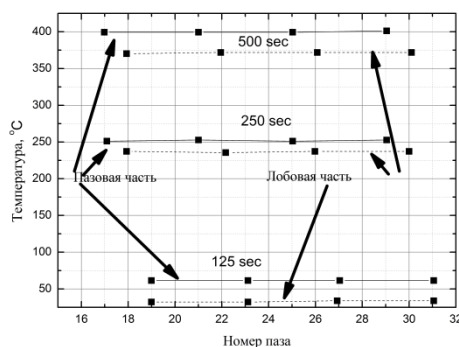


Рис.6. Распределение температур элементов индуктора по его длине в начале, середине и конце интервала работы  $t_k$  при скорости движения ВЭ, равной 10.6 м/с (скольжение 0.2)

Следует отметить, что температуры элементов индуктора и ВЭ в активной зоне существенно снижаются за счет «оттока» тепла в выступающие за пределы активной зоны и движущиеся участки ВЭ. Эта особенность принципиально отличает ЛАД от обычного вращающегося двигателя, снижая тепловые нагрузки машины в активной зоне.

На рис. 7 показаны кривые нагрева элементов индуктора и ВЭ при движении поезда со скоростью 0.005 м/с.

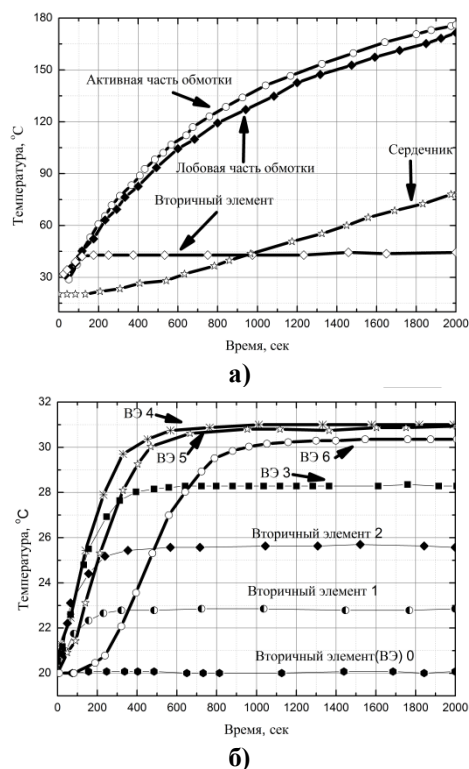


Рис. 7. Кривые нагрева элементов индуктора и ВЭ при скорости 0.005 м/с

Номера участков отсчитываются от участка на входном краю индуктора: 0 – перед входным краем, 1- 4 – в зоне расположения индуктора, более 4 – за пределами выходного края индуктора. Следует при этом учитывать, что на участке с каким-либо номером с течением времени появляются новые менее нагретые участки движущегося ВЭ, заменяя прежние.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что использование инструмента детализированных электрических, магнитных и тепловых схем замещения позволяет при малых затратах времени (несколько минут) с помощью компьютеров со скромными вычислительными возможностями рассчитать подробную картину распределения электрических, магнитных и тепловых характеристик двигателя с учетом выноса тепла из активной зоны при движении

вторичного элемента. Эти особенности предлагаемого метода расчета характеристик ЛАД особенно необходимы на этапе проектирования транспортных систем с линейными электроприводами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности структуры и режимов работы линейного электропривода конвейерного (тележечного) поезда / П.И. Захарченко, С.В. Карась, Ф.Н. Сарапулов. Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ / Под общей ред. академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. С. 331-343.
2. Иваненко В.С., Карась С.В. Нагрев двухстороннего линейного асинхронного электродвигателя // Изв. вузов. Горный журнал. – 1987. – №11. – С. 109 – 114.
3. Иваненко В.С., Карась С.В., Бурковский А.Н. Выбор способа охлаждения, тепловой расчет и экспериментальная проверка индуктора низкоскоростного линейного асинхронного двигателя / Взрывозащищенные электрические машины. Сб. науч. тр. ВНИИВЭ. – Донецк: ВНИИВЭ, 1985. – С. 96 – 102.
4. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с
5. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / Под ред. Б.К. Клокова. М.: МЭИ, 1987. 72 с.
6. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. 2-е издание, перераб. и дополн. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 431 с.
7. Sarapulov, F.N., Sarapulov, S.F., Frizen, V.E. Use of detailed equivalent circuit method for investigation of electromagnetic, thermal and hydrodynamic processes in induction electric engineering units. Acta Technica CSAV vol. 60, no 2, 2015, pp. 131-153
8. Prakht, V.A. et. al. Document Computer-based modeling of moving cylindrical ferromagnetic billets induction heating. COMPEL vol. 33, no1-2, pp. 273-285, 2014
9. I. Smolyanov, E. Shvydkiy, F. Sarapulov, S. Sarapulov. Research Electromechanical Characteristics of Magnetohydrodynamic Pump Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 EIConRus) February 1-3, 2017, pp. 249-253.